

На правах рукописи

Кочнева Луиза Бариевна

**МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
И ФОТОФОРЕЗ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург-2007

Работа выполнена на кафедре общей и молекулярной физики и в отделе теплофизики и поверхностных явлений НИИ физики и прикладной математики Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент Береснев Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Зубарев Андрей Юрьевич  
кандидат физико-математических наук,  
Поддубный Василий Алексеевич

Ведущая организация: Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Защита состоится «8» февраля 2007г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук при Уральском государственном университете им. А.М. Горького (620083, г. Екатеринбург, К-83, пр. Ленина 51, комн. 248).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Автореферат разослан

«\_\_\_» декабря 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.286.01,  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Н.В. Кудреватых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Процессы взаимодействия электромагнитного излучения с аэрозольными частицами и их многочисленные и разнообразные следствия являются предметом исследования оптики атмосферного аэрозоля, теплофизики аэродисперсных систем, метеорологии и климатологии. К настоящему времени установлена ключевая роль атмосферного аэрозоля в климатообразующих процессах (прямое и косвенное аэрозольное радиационное возмущающее воздействие [1-2]), которая проявляется не только эпизодически при крупных вулканических извержениях, но и в возрастающей антропогенной нагрузке за счет процессов горения органического топлива и биомассы. Было установлено, что помимо рассеивающего излучение сульфатного аэрозоля важнейший вклад в радиационные атмосферные процессы вносит сажевый аэрозоль («черный углерод»), обладающий выраженными поглощающими свойствами в широком диапазоне длин волн. Контроль за поступлением частиц сажи в атмосферу, по-видимому, не менее необходим, чем контроль за эмиссией известных парниковых газов [3].

Известно, что достаточно информативными характеристиками взаимодействия излучения с аэрозолем (как для индивидуальных частиц, так и для аэродисперсных систем в целом) являются характеристики светорассеяния. Принципиально важными, а в ряде случаев – определяющими, являются и микрофизические характеристики поглощенного излучения. Например, традиционными являются исследования оптических и тепловых полей внутри поглощающих частиц [4], результаты которых необходимы при изучении нагрева, испарения и разрушения как воднокапельного, так и твердого аэрозоля под воздействием интенсивного излучения. Неоднородное по объему поглощение излучения приводит к неоднородности температуры поверхности и, как следствие, к радиометрическому фотофорезу частиц [5], потенциальная значимость которого в вертикальном переносе стратосферных аэрозолей в поле излучения является предметом многолетних дискуссий. Новыми и неожиданными можно считать результаты [6], свидетельствующие о принципиальной роли фотофореза (наряду с силами светового давления) в формировании газо-пылевых протопланетных облаков около «молодых» звезд.

Эффекты упорядоченного движения частиц в поле излучения наиболее выражено должны проявляться в стратосфере, где циркуляция воздушных масс существенно отличается от тропосферной [7], а возрастание температуры с высотой делает ее термически и механически устойчивой. В таких условиях могут более отчетливо проявляться индивидуальные транспортные свойства частиц, которые в тропосфере частично или полностью подавляются развитой конвекцией и разномасштабным турбулентным переносом.

Изучение транспортных характеристик стратосферного аэрозоля (сил, действующих на частицы; скоростей их движения; времен пребывания аэрозольных частиц в атмосфере) актуально по целому ряду причин: это анализ механизмов относительной устойчивости стратосферных аэрозольных слоев и облаков различного происхождения; изучение динамики релаксационных пост-

вулканических процессов; исследование роли аэрозоля в стратосферно-тропосферном обмене. Не менее актуально изучение быстропотекающего загрязнения стратосферы сажевым аэрозолем, проникающим из тропосферы (авиатранспорт) и с поверхности Земли (горение топлива и биомассы) на большие высоты и интенсивно поглощающим солнечное излучение. В частности, получили подтверждение данные [8] о проникновении частиц сажи от авиатранспорта на высоты вплоть до 23 км, причем массовая концентрация сажи оказалась значительно больше ранее измеренной [9]. Природа физических механизмов миграции частиц сажи значительно выше коридоров полетов авиатранспорта и их накопления на высотах нижней и средней стратосферы остается до конца не выясненной.

**Целями работы** являются расчет и анализ микрофизических оптических характеристик, ответственных за поглощающие свойства и последующую динамику частиц атмосферного аэрозоля; расчет и анализ характеристик фотофоретического движения аэрозольных частиц в поле солнечного и теплового излучения в атмосфере Земли.

**Основными задачами работы являются:**

1. Анализ комплекса микрофизических оптических характеристик (МОХ) основных типов атмосферного аэрозоля и модельных (по комплексному показателю преломления) частиц в рамках теории Ми;
2. Постановка задач о фотофорезе атмосферных аэрозолей в поле коротковолнового солнечного и длинноволнового уходящего излучения Земли; расчет сил, скоростей и других характеристик фотофоретического движения частиц сажи;
3. Оценка характеристик оседания частиц с заданных высот и их подъема до определенных высот под действием фотофоретических сил;
4. Исследование эффективности действия сил радиометрического фотофореза в вертикальном переносе аэрозолей в земной стратосфере.

**Методы исследования.** Поставленные задачи носят комплексный, междисциплинарный характер и подразумевают электродинамический анализ процессов поглощения излучения в объеме частицы; газокинетический расчет сил и скоростей движения частиц; задание метеополей температуры, давления и интенсивностей излучения на различных высотах в атмосфере.

**Достоверность и обоснованность** результатов и выводов диссертационной работы обеспечиваются адекватностью разработанной физико-математической модели и ее составных компонентов; количественным и качественным экспериментальным подтверждением основных выводов используемой газокинетической теории радиометрического фотофореза; сопоставлением полученных результатов с теоретическими предсказаниями других авторов и с известными наблюдательными данными.

**Новые научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Обоснована формулировка предлагаемого набора микрофизических оптических характеристик, связанных с поглощением излучения и последующей динамикой частиц. Анализ совокупности зависимостей данных характеристик от дифракционного параметра позволил

классифицировать частицы основных типов атмосферного аэрозоля как слабо-, умеренно- и сильнопоглощающие и предложить количественные критерии такой классификации для комплексного показателя преломления.

2. Впервые проведены систематический расчет и анализ свойств фактора асимметрии поглощения излучения  $J_1$  для основных типов атмосферного аэрозоля и модельных частиц, что позволило выявить общие закономерности изменения величины и знака данной характеристики. В результате замыкается комплексная задача о фотофорезе и становится возможным расчет сил и скоростей движения частиц.
3. Впервые проведена постановка модельной задачи о фотофорезе в поле длинноволнового уходящего излучения Земли. Получены результаты для сил, скоростей движения, времен оседания и подъема частиц сажи на различных высотах в стратосфере в случае «солнечного» и «теплового» фотофореза.
4. Впервые представлены результаты расчетов высот левитации в стратосфере (где сила тяжести уравнивается силами радиометрического фотофореза) для частиц сажи с задаваемыми оптическими и теплофизическими характеристиками.
5. Показано, что радиометрический фотофорез (как «солнечный», так и «тепловой») возможно рассматривать как значимый механизм вертикального переноса частиц стратосферного аэрозоля.

**Научная и практическая значимость работы.** Результаты работы расширяют и углубляют представления о процессах переноса атмосферного аэрозоля в поле излучения и могут быть использованы:

- при разработке новых, более реалистичных транспортных аэрозольных моделей средней атмосферы;
- в оценках радиационного возмущающего воздействия от сажевого аэрозоля в стратосфере;
- в лекционных курсах по физике атмосферных аэрозолей.

Работа выполнялась в рамках планов научно-исследовательских работ НИИ физики и прикладной математики Уральского государственного университета (тема 2.2.2 ЕЗН); по программе Минобразования РФ «Поддержка ведущих научно-педагогических коллективов» (2003-2005 гг.); при поддержке грантов РФФИ № 99-01-00143-а, 01-01-96451-р2001урал, 03-01-00049-а, 04-01-96096-р2004урал, 06-01-00669-а.

**Публикации и апробация работы.** По теме диссертации всего опубликовано 41 печатная работа. Из них – 6 статей в научных журналах, 4 статьи в сборниках научных трудов и 28 тезисов докладов.

Основные результаты работы докладывались:

- на международных конференциях: European Aerosol Conference – EAC 2001, Лейпциг; EAC 2004, Будапешт; EAC 2005, Гент; Conference on visibility, aerosols and atmospheric optics, Вена, 2006;
- на российских конференциях: VIII–XIII Рабочие группы «Аэрозоли Сибири» (2001-2006 гг.), г. Томск.

**Вклад автора.** Автор принимала непосредственное участие во всех этапах выполнения работы: в систематизации и обобщении известных литературных данных, в постановке решаемых задач, в проведении необходимых расчетов и анализе полученных результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа содержит 130 страниц основного текста, 114 рисунков, 4 таблицы, список цитируемой литературы из 176 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обсуждается актуальность темы, современное состояние вопроса, сформулированы цель и задачи исследований, представлено основное содержание диссертационной работы.

**Первая глава** посвящена методам описания процессов переноса в аэродисперсных системах в поле направленного электромагнитного излучения. Общая формулировка задачи о движении и теплообмене аэрозольной частицы в поле излучения сводится к следующему. Сферическая частица радиуса  $R_p$  поглощает электромагнитную энергию в поле плоской волны излучения интенсивности  $I$  и длины  $\lambda$ . Происходит нагрев частицы, описываемый дифференциальным уравнением теплопроводности

$$c_p \rho_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \text{div}(\lambda_p \text{grad} T_p) + Q(\mathbf{r}), \quad (1)$$

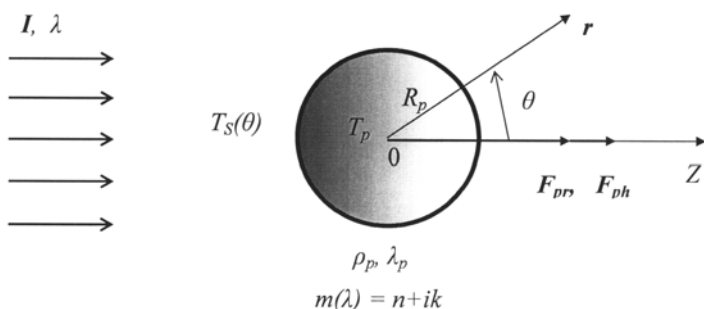


Рис.1. Аэрозольная частица в поле излучения.

где  $T_p$  - локальная температура в объеме частицы,  $Q(\mathbf{r})$  - объемная мощность внутренних источников тепла,  $\mathbf{r}$  - радиус-вектор в сферической системе координат с началом в центре частицы (рис. 1).

Величина  $Q(\mathbf{r})$  определяется как [4]

$$Q(\mathbf{r}) = -\text{div} \mathbf{I}, \quad |\mathbf{I}| = \frac{c}{8\pi} \text{Re}[\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i^*] = \frac{c E_i^2}{8\pi}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}_i$  и  $\mathbf{H}_i$  - напряженности электрического и магнитного полей в падающей волне. В случае одностороннего направленного излучения  $Q(\mathbf{r})$  имеет вид

$$Q(\mathbf{r}) = 2nk_0 I B(\mathbf{r}), \quad B(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{|E_a(r, \theta, \varphi)|^2}{E_i^2} d\varphi = B(r, \theta, \varphi = \frac{\pi}{4}) \quad (3)$$

где  $E_a(\vec{r})$  - модуль локальной напряженности электрического поля внутри частицы,  $B(\vec{r})$  - безразмерная функция источников энергии в объеме частицы,  $m(\lambda) = n + ik$  - комплексный показатель преломления (КПП) вещества частицы для данной длины волны излучения.

При рассмотрении стационарных процессов взаимодействия частицы с низкоинтенсивным излучением можно использовать известное решение краевой задачи на основе стационарного уравнения теплопроводности [5]:

$$T_p(x, \theta) = \sum_{l=0}^{\infty} P_l(\cos \theta) [c_l x^l + b_l x^{l+1}] \quad x = r/R_p. \quad (4)$$

Коэффициенты  $c_l$  и  $b_l$  находятся из граничных условий теплообмена на поверхности частицы и учитывают характеристики излучения и параметры газовой среды. Коэффициенты  $b_l$  определяются через моменты различного порядка от функции  $B(\vec{r})$

$$J_l = (2l+1)kn\rho \int_0^{\pi} \sin \theta \cdot P_l(\cos \theta) d\theta \int_0^1 x^{l+2} B(x, \theta, \varphi) dx, \quad (5)$$

где  $\rho = 2\pi R_p / \lambda$  - дифракционный параметр. Момент нулевого порядка при  $l=0$  пропорционален безразмерному фактору эффективности поглощения излучения  $J_0 = (1/4)Q_{abs}$ , а момент первого порядка при  $l=1$  представляет собой фактор асимметрии поглощения излучения  $J_1$ .

Определив температуру в объеме  $T_p$  и на поверхности частицы  $T_s(\theta)$ , можно рассчитать фотофоретическую силу радиометрической природы, действующую на неоднородно нагретую частицу в разреженном газе [5]:

$$F_{ph} = -\frac{2\pi}{3} \left( \frac{\pi M}{8RT} \right)^{1/2} R_p^2 I J_1(\rho, m) F(Kn, \Lambda, \alpha_E, \alpha_\tau, \alpha_n), \quad (6)$$

где  $F(Kn, \Lambda, \alpha_E, \alpha_\tau, \alpha_n)$  - функция числа  $Kn = l_g / R_p$ , отношения коэффициентов теплопроводностей частицы и газа  $\Lambda = \lambda_p / \lambda_g$ , коэффициентов аккомодации импульса и энергии молекул газа на поверхности частицы. Выражение для полной скорости стационарного движения частицы может быть записано как

$$\vec{U}_p = \vec{U}_{mg} + \vec{U}_{ph} + \vec{U}_{pr}, \quad (7)$$

где парциальные скорости означают скорость гравитационной седиментации, фотофоретическую скорость и скорость движения частицы под действием сил светового давления соответственно.

Таким образом, при общем анализе задач о теплообмене и движении частиц в поле направленного излучения целесообразно различать три взаимосвязанные части проблемы: 1) *электродинамическую задачу* (расчет характеристик поглощенного электромагнитного поля в объеме частицы); 2) *тепловую задачу* (расчет температурных полей в объеме и на поверхности

частицы); 3) *газокинетическую задачу* (описание теплопереноса в газовой фазе, вычисление сил, моментов сил и скоростей движения частиц).

В линейной по интенсивности излучения постановке электродинамическая задача может быть рассмотрена независимо от двух других. Ее решение дает информацию о распределении поглощенной электромагнитной энергии внутри частицы (функции источников  $B(\vec{r})$ ); через которую рассчитываются фактор эффективности поглощения излучения (безразмерное сечение поглощения)  $Q_{abs}$ ; фактор асимметрии поглощения излучения  $J_1$ ; фактор эффективности светового давления  $Q_{pr}$ ; т.е. *микрофизические оптические характеристики* (МОХ), ответственные за поглощение электромагнитной энергии и последующую динамику частиц в поле направленного излучения.

В диссертации кратко изложены методы описания взаимодействия электромагнитного излучения с аэрозольной частицей (классическая теория Ми о рассеянии и поглощении электромагнитного излучения сферической частицей, а также другие методы и подходы проблемы взаимодействия электромагнитного излучения с аэрозольными частицами).

Представлено описание существующих классификаций глобальных типов атмосферного аэрозоля. Разнообразие видов частиц, присутствующих в земной атмосфере, большое число физико-химических процессов образования частиц и их трансформации определяют известные сложности при попытке создания универсальной классификации типов атмосферного аэрозоля. Рассмотрены различные признаки, положенные в основу возможных классификаций: источники и механизмы образования аэрозолей в атмосфере, местонахождение дисперсных частиц в различных по высоте слоях земной атмосферы – тропосфере, стратосфере и мезосфере. Свойства частиц, которые представляются важными для последующего анализа МОХ и динамических характеристик аэрозоля в поле излучения, по-видимому, следующие: 1) химический состав аэрозоля, определяющий оптические свойства частиц; 2) распределение частиц того или иного глобального типа по размерам; 3) морфология (форма и структура) частиц; 4) комплексный показатель преломления для требуемого интервала длин волн; 5) теплофизические характеристики (плотность и теплопроводность частиц).

В первой главе приводятся данные, содержащие информацию об оптических постоянных основных типов атмосферного аэрозоля, основанные на достоверных литературных источниках, и отдельно – сведения о характеристиках частиц сажи. Эти данные используются в дальнейшем в расчетах микрофизических характеристик и скоростей фотофоретического движения частиц.

**Вторая глава** посвящена расчету и анализу МОХ, связанных с поглощением излучения и последующей динамикой аэрозольных частиц. В качестве математической модели процесса поглощения частицей используется классическая теория Ми, которая позволяет в замкнутой форме рассчитать все необходимые МОХ. Проанализированы известные методики расчетов МОХ и



сделан выбор адекватных задаче алгоритмов. В работе как основной использовался известный алгоритм Борена-Хафмена [10,11], на основе которого были проведены унифицированные расчеты всего комплекса МОХ. В дальнейшем это позволило конструктивно классифицировать частицы атмосферного аэрозоля по поглощающим свойствам.

Представлены результаты расчета и анализа МОХ в зависимости от дифракционного параметра  $\rho$  для двух характерных длин волн:  $\lambda = 0,525$  мкм (вблизи максимума интенсивности в спектре падающего солнечного излучения) и  $\lambda = 10,6$  мкм (для уходящего теплового излучения Земли). Распределение источников электромагнитной энергии характеризуется безразмерной функцией источников  $B(\vec{r})$  или интенсивностью внутреннего поля  $I_{avg}(r)$

$$I_{avg}(r) = \frac{E_i^2}{2} \int_0^\pi B(r, \theta, \varphi) \sin \theta d\theta. \quad (8)$$

Результаты расчетов по ур. (8) для капли чистой воды приведены на рис. 2.

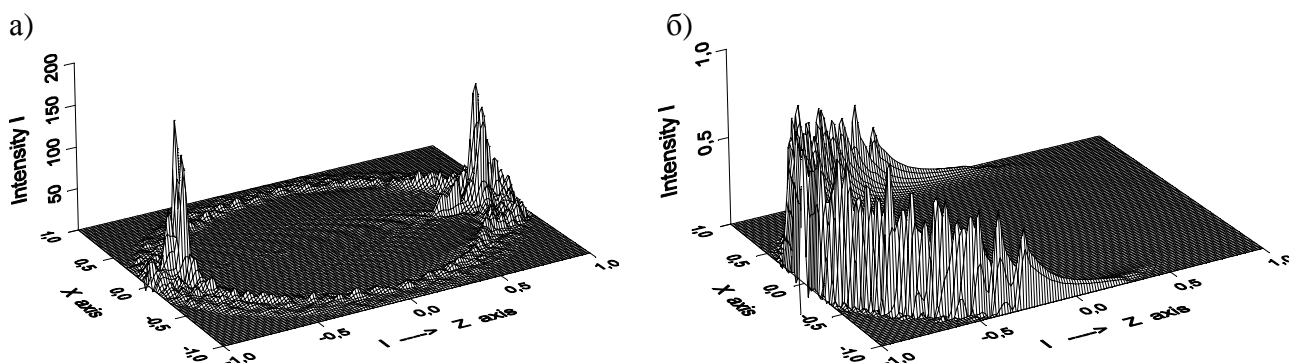


Рис. 2. Интенсивность внутреннего поля  $I_{avg}$  в капле чистой воды  $\rho = 100$ :

а)  $\lambda = 0,525$  мкм,  $m = 1,334 + 1,32 \cdot 10^{-9}i$ ; б)  $\lambda = 10,6$  мкм,  $m = 1,144 + 0,0671i$ .

Фактор эффективности поглощения излучения является одной из определяющих величин во многих задачах, связанных с взаимодействием излучения с аэрозольной частицей. Выражение для данной характеристики выглядит следующим образом:

$$Q_{abs} = 4nk\rho \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^1 x^2 B(x, \theta, \phi = \frac{\pi}{4}) dx. \quad (9)$$

При поглощении и рассеянии света происходит обмен импульсом между электромагнитным полем и частицей. В случае плоской волны монохроматического излучения, когда изменением амплитуды падающего поля на диаметре сферической частицы можно пренебречь, выражение для радиальной силы светового давления записывается как [4,10]:

$$F_{pr} = Q_{pr}(\rho, m) \pi R_p^2 I / c.$$

Фактор светового давления  $Q_{pr}$  в рамках теории Ми обычно рассчитывается через факторы эффективности рассеяния  $Q_{sca}$  и поглощения  $Q_{abs}$ :

$$Q_{pr} = Q_{abs} + Q_{sca}(1 - \langle \cos \theta \rangle). \quad (10)$$

Процесс обмена импульсом между излучением и частицей можно разделить на два этапа: «захват» частицей энергии из поля и частичное ее переизлучение, вызывающее возврат импульса полю. Таким образом, фактор  $Q_{pr}$  естественным образом входит в комплекс исследуемых МОХ, хотя и не связан непосредственно с тепловым действием поглощенного излучения.

Расчет фактора  $J_1$  является основным результатом решения электродинамической задачи фотофореза. Выражение для  $J_1$  записывается в следующем виде [5]:

$$J_1 = 3nk\rho \int_0^\pi \sin \theta P_1(\cos \theta) d\theta \int_0^1 x^3 B(x, \theta, \varphi = \pi/4) dx \quad (11)$$

Величина  $J_1$  нормирована и изменяется в пределах  $-0,5 \leq J_1 \leq 0,5$ . Отрицательные значения  $J_1$  соответствуют преимущественному нагреву фронтальной стороны частицы и отвечают «положительному» фотофорезу, положительные – преимущественному нагреву тыльной стороны и «отрицательному» фотофорезу. Фактор  $J_1$  характеризует направление движения частицы и в значительной степени определяет абсолютные значения силы и скорости фотофореза. Также в главе представлен обзор поведения указанных характеристик для частиц более сложной структуры и геометрии.

Анализ закономерностей в зависимостях характеристик от дифракционного параметра из представленного комплекса МОХ позволяет предположить, что существуют три основных группы в зависимости от значений  $m$ : слабо-, умеренно- и сильно поглощающие излучение частицы. Формирование групп модельных частиц по данному принципу с задаваемыми значениями вещественной и мнимой частей комплексного показателя преломления (без нарушения соотношений Крамерса-Кронига [10]) полностью подтвердило данные предположения. Анализ полученных результатов представлен на рис. 3-7.

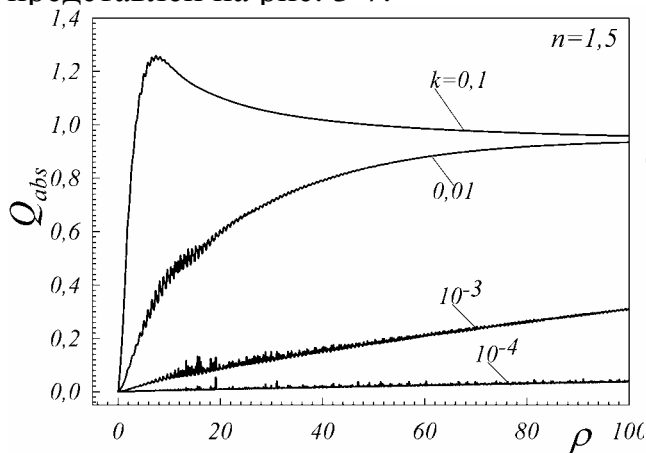


Рис. 3. Зависимость  $Q_{abs}$  от  $\rho$  для модельных частиц при  $n=1,5$  и  $k = 0,1; 0,001; 10^{-3}; 10^{-4}$ .

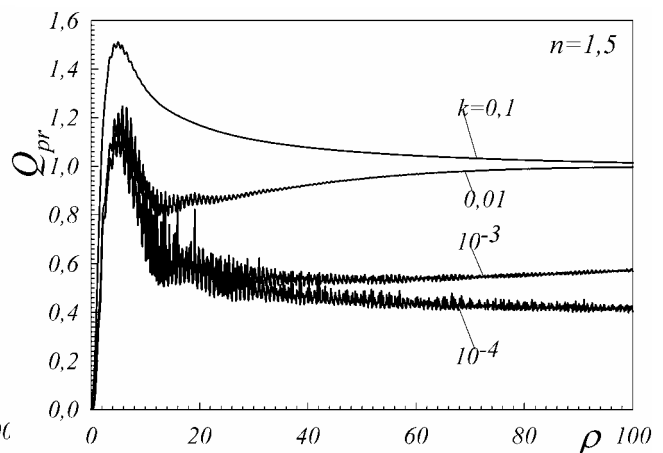


Рис. 4. Зависимость  $Q_{pr}$  от  $\rho$  для модельных частиц при  $n=1,5$  и  $k = 0,1; 0,001; 10^{-3}; 10^{-4}$ .

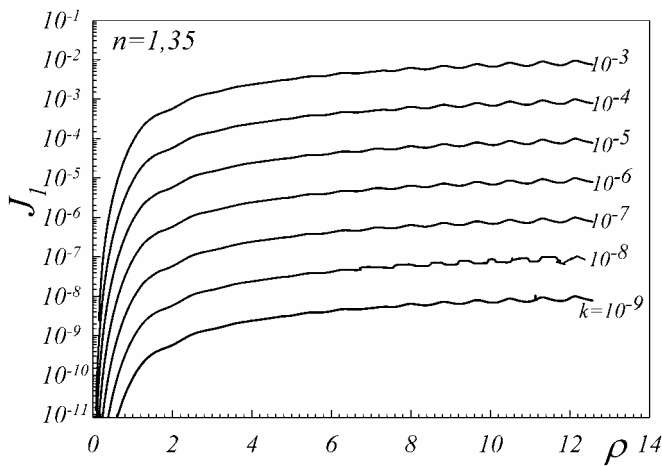


Рис.5. Зависимость  $J_1$  от  $\rho$  для слабо поглощающих излучение частиц при  $n = 1,35$  и  $k = 10^{-9} \div 10^{-3}$ .

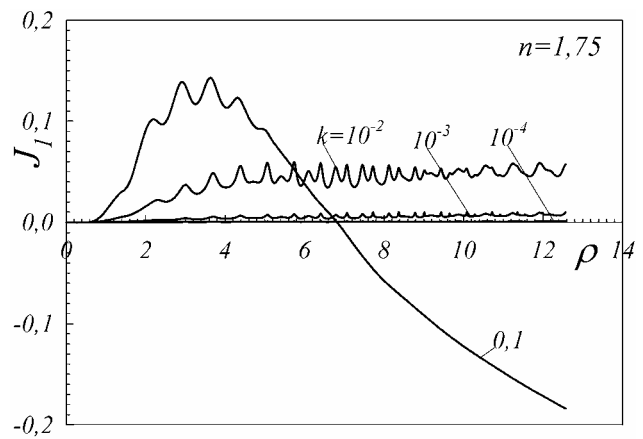


Рис.6. Зависимость  $J_1$  от  $\rho$  для умеренно поглощающих излучение частиц при  $n = 1,75$  и  $k = 10^{-1} \div 10^{-4}$ .

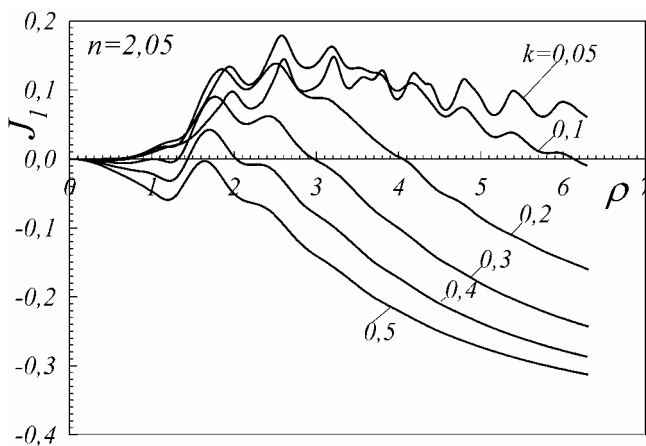


Рис.7. Зависимость  $J_1$  от  $\rho$  для сильно поглощающих излучение частиц при  $n = 2,05$  и  $k = 0,05 \div 0,4$ .

Следует отметить, что используемая классификация частиц по их поглощающим свойствам (слабо-, умеренно- и сильнопоглощающие) достаточно условна и приобретает однозначность лишь для фиксированного диапазона длин волн. Например, поглощение излучения целым рядом атмосферных аэрозолей коренным образом различается для видимого и инфракрасного диапазонов длин волн. При этом некоторые частицы следует переводить из категории слабо в категорию сильно поглощающих излучение.

**Третья глава** посвящена постановке задачи о фотофлорезе атмосферных аэрозолей, методам ее решения, анализу характеристик фотофлоретического движения частиц, оценке значимости данного явления для вертикального переноса аэрозолей в средней атмосфере.

**Постановка задачи и метод решения.** Сферическая частица радиуса  $R_p$  взвешена в атмосфере на некоторой высоте  $z$  (от уровня океана) и находится в поле направленного электромагнитного излучения. Она характеризуется плотностью  $\rho_p$ , коэффициентом теплопроводности  $\lambda_p$  и комплексным показателем преломления  $m = n + ik$  (рис. 8). Давление воздуха равно  $p(z)$ , температура -  $T(z)$ , соответствующий ей коэффициент теплопроводности газа -  $\lambda_g(T)$ . Стандартные и справочные модели атмосферы задают вертикальные профили температуры, давления и плотности воздуха на высотах от 0 до 100 км. В поле падающего коротковолнового солнечного и уходящего

длинноволнового излучения Земли частица неоднородно нагревается, и на нее в разреженном газе действует суммарная фотофоретическая сила:

$$F_{ph} = F_S^{\pm} + F_{th}^{\pm}, \quad (12)$$

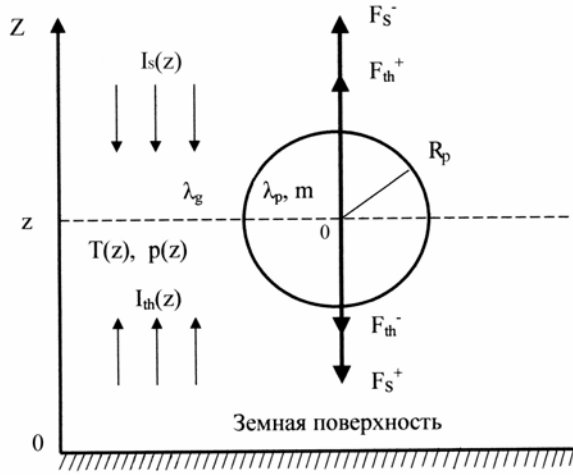


Рис. 8. Постановка задачи о фотофорезе атмосферных аэрозолей.

где индекс «+» обозначает силы положительного фотофореза (движение частиц по направлению излучения), а индекс «-» - силы отрицательного фотофореза (движение против направления излучения).

Помимо фотофоретических сил, на движущуюся частицу действует сила тяжести и сила сопротивления со стороны газа. Фотофоретическая сила для однородной сферической частицы дается ур. (6), а скорость фотофореза вычисляется по формуле

$$U_{ph}(z) = -\frac{\pi}{2(8+\pi)} \frac{IJ_1}{p_g(z)} \Phi(Kn, \Lambda). \quad (13)$$

Данные результаты базируются на газокINETической теории фотофореза в газах [5], которая надежно подтверждена экспериментально [12].

Информативными характеристиками являются также отношения фотофоретической силы к силе тяжести и скорости фотофореза к скорости гравитационной седиментации частицы:

$$\alpha(z) = F_{ph}(z)/F_{mg} = \beta(z) = U_{ph}(z)/U_{mg}(z), \quad (14)$$

где  $F_{mg} = 4/3 \pi R_p^3 \rho_p g$ , а  $U_{mg}(z)$  вычисляется по формуле

$$U_{mg}(z) = \frac{2\pi^{1/2} R_p \rho_p g}{(\pi+8) p_g(z) \left( \frac{M}{2RT(z)} \right)^{1/2} \Psi_3}, \quad (15)$$

в которой учтены результаты газокINETической теории для силы сопротивления частицы [13]. Полная скорость стационарного вертикального перемещения частицы определяется выражением

$$\vec{U}_p(z) = \vec{U}_{mg}(z) + \vec{U}_{ph}(z), \quad (16)$$

положительное направление скорости  $\vec{U}_p(z)$  выбрано по направлению силы тяжести.

В задаче об атмосферном фотофорезе частиц необходимо предварительное исследование высотных зависимостей интенсивностей солнечного и теплового излучения. Анализ известных результатов показывает, что в задаче о «солнечном» фотофорезе интенсивность падающего излучения можно считать не зависящей от высоты  $z$  и равной среднему значению

интегральной интенсивности солнечной радиации на верхней границе атмосферы (солнечной постоянной  $I_{S0}$ ). Оценки показывают, что различие искомой интенсивности суммарной (прямой и рассеянной) коротковолновой радиации  $I_S(z)$  и величиной  $I_{S0} = (1366 \pm 2) \text{ Вт/м}^2$  не превысит 3-5% на нижней границе стратосферы (например, [14]). В качестве характерного диапазона длин волн для определения значений КПП и вычисления фактора  $J_1$  выбирается интервал  $\lambda_S = 0,50 \div 0,55 \text{ мкм}$ . В более сложной задаче о «тепловом» фотофорезе необходимо привлечение статистических справочных моделей атмосферы с включением в них данных для широтно-сезонных зависимостей для интенсивностей уходящего теплового излучения  $I_{th}(z)$ . Расчеты вертикальных профилей интегральных интенсивностей  $I_{th}(z)$  (рис. 9) проводились с помощью пакета прикладных программ FIRE-ARMS [15]. Здесь в качестве характерного диапазона длин волн выбран интервал  $\lambda_{th} = 10 \div 11 \text{ мкм}$  из известного окна прозрачности атмосферы в длинноволновой области.

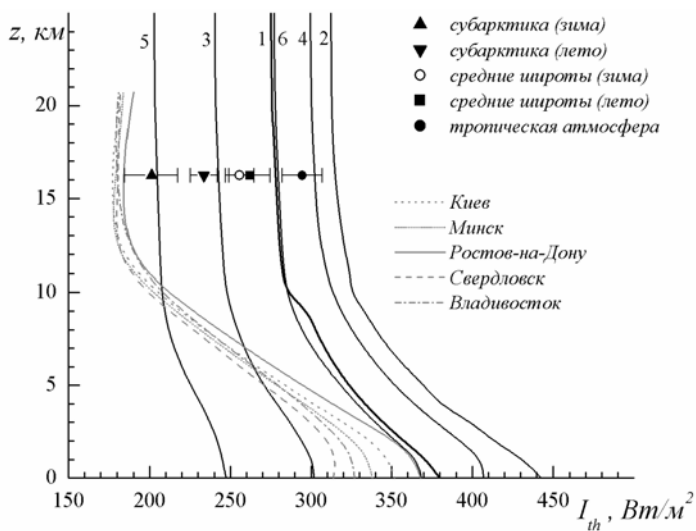


Рис. 9. Сопоставление данных, рассчитанных с помощью пакета FIRE-ARMS (сплошные черные линии), актинометрических радиозондовых профилей (Матвеев, 1984) (серые линии с расшифровкой на рисунке) и восстановленных с помощью пакета ARTS профилей теплового излучения на уровне 100 гПа (Buehler et al., 2006); 1 - стандартная атмосфера США; 2 - модель тропической атмосферы; 3 - модель средних широт (зима); 4 - модель средних широт (лето); 5 - модель субарктики (зима); 6 - модель субарктики (лето).

#### *Фотофорез аэрозолей в поле коротковолнового солнечного излучения.*

Расчеты характеристик фотофоретического движения (6), (12)-(16) были выполнены для некоторых представителей основных типов атмосферного аэрозоля при соответствующих значениях плотности и коэффициента теплопроводности частиц. Основной интерес представляют результаты для хорошо поглощающих излучение частиц сажи с варьируемыми в известных диапазонах значениями КПП, плотности ( $\rho_p = 165 \div 2000 \text{ кг/м}^3$ ) и теплопроводности ( $\Lambda = 5 \div 150$ ). На рис. 10 представлены результаты расчетов силы отрицательного «солнечного» фотофореза для частиц сажи при минимальных в расчетах значениях плотности и теплопроводности. Максимумы фотофоретической силы на 10÷12 км обусловлены ее газокинетическим экстремумом при  $Kn \approx 0,30 \div 0,35$ , соответствующих этим высотам. Абсолютные значения сил малы ( $10^{-17} \div 10^{-14} \text{ Н}$ ), но вполне достаточны для конкуренции с силой тяжести. Рассмотренные размеры частиц на рис. 10 соответствуют области отрицательного «солнечного» фотофореза при  $J_1 > 0$  на

рис. 11; для частиц с  $R_p < 0,07$  мкм и  $R_p > 0,5$  мкм реализуется положительный фотофорез, который усиливает действие силы тяжести.

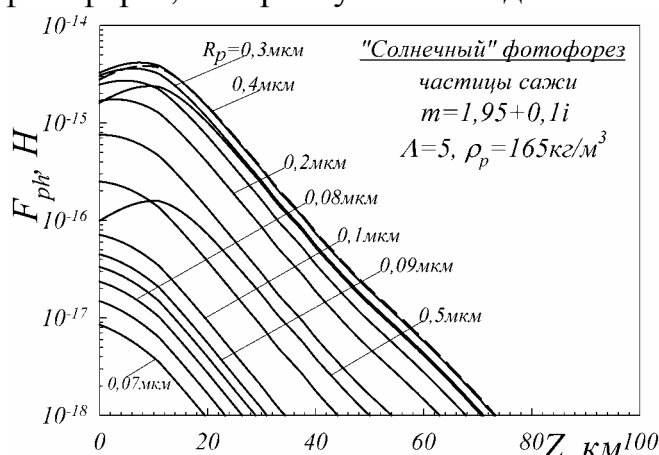


Рис. 10. Сила отрицательного «солнечного» фотофореза  $F_{ph}$  для частиц сажи соответствующих размеров в зависимости от высоты  $Z$ .

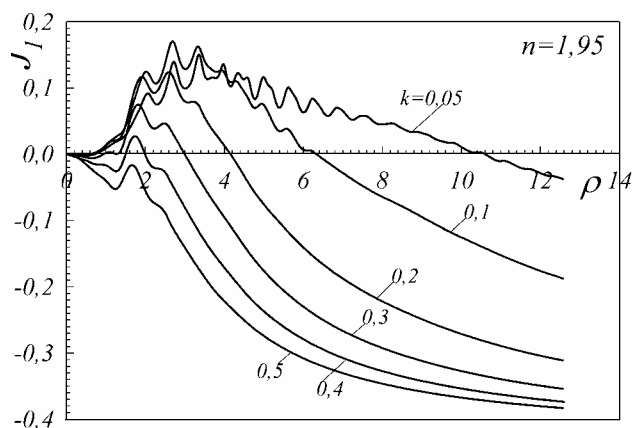


Рис. 11. Зависимости фактора  $J_1$  от  $\rho$  при  $\lambda = 0,5$  мкм для частиц сажи с  $n = 1,95$  и  $k = 0,05 \div 0,5$ .

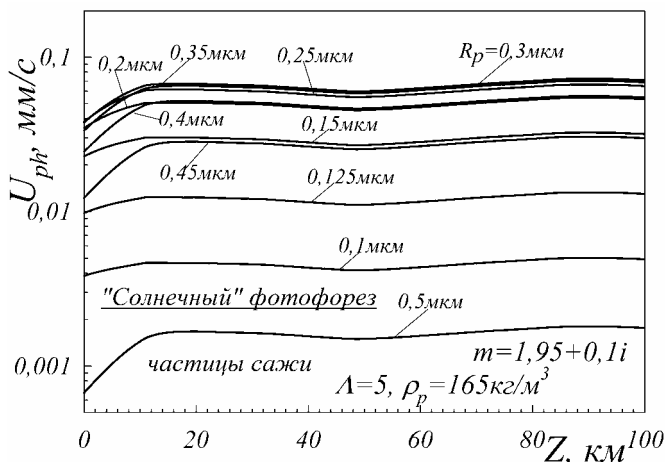
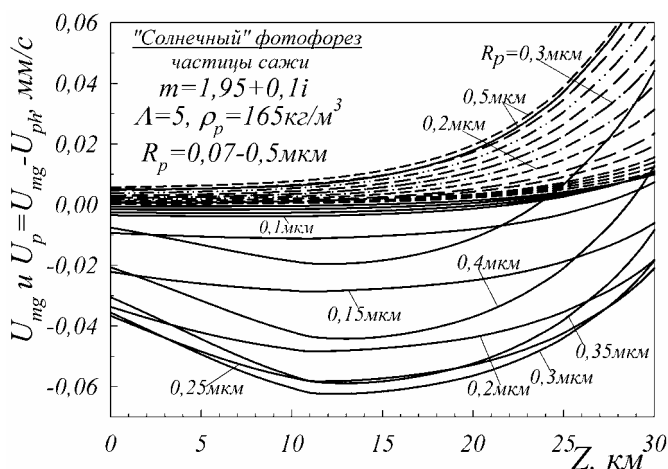


Рис. 12. Скорости отрицательного «солнечного» фотофореза.



На рис. 12 представлены результаты расчетов скорости отрицательного «солнечного» фотофореза для частиц сажи с теми же значениями параметров, что и на рис. 10. Расчеты скоростей основывались на предположении квазистационарности движения частиц с использованием конечно-разностной схемы для значений температуры и давления на уровнях стандартной и справочных атмосфер.

Рис. 13. Сопоставление расчетов скорости гравитационного оседания частиц (пунктирные кривые) и полной скорости оседания частиц с учетом действия сил отрицательного «солнечного» фотофореза (сплошные кривые).

Видно, что скорости движения составляют единицы и десятки мкм/с, причем они максимальны для частиц с  $R_p = 0,2 \div 0,4$  мкм.

Увеличение теплопроводности и плотности частиц, как и ожидалось, уменьшают скорость фотофореза. Выше примерно 15 км скорости фотофореза для частиц различных размеров практически не зависят от высоты.

Сопоставление расчетов скорости гравитационного оседания  $U_{mg}$  и полной скорости оседания частиц  $U_p$  с учетом действия силы отрицательного «солнечного» фотофореза, направленной против силы тяжести, представлено на рис. 13. Видно, что в стратосфере отрицательный «солнечный» фотофорез для частиц с рассматриваемыми теплофизическими свойствами в диапазоне  $R_p = 0,15 \div 0,5$  мкм порождает вертикальные скорости движения, сопоставимые по величине и обратные по знаку скоростям гравитационного оседания (знак последних выбран положительным).

На рис. 14 представлены значения параметра  $\alpha$  как функции высоты  $z$ . Для легких и слаботеплопроводных частиц сажи при оптимальных оптических характеристиках предсказываются значительные превышения силы фотофореза над силой тяжести. Параметр  $\alpha$  максимален для высот тропосферы и нижней стратосферы, но в средней стратосфере быстро уменьшается, а в мезосфере близок к нулю. Однако, для тропосферы характерны процессы интенсивного перемешивания воздушных масс, которые способны исказить действие сил фотофореза в вертикальном переносе частиц, происходящем (по умолчанию) в стационарной атмосфере.

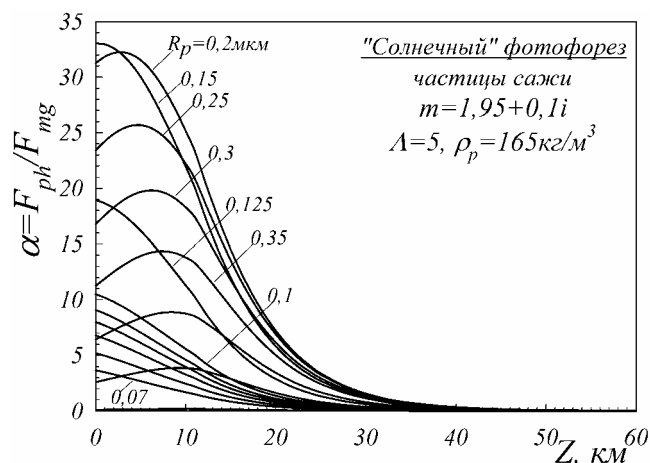


Рис. 14. Параметр  $\alpha = F_{ph}(z) / F_{mg}$  как функция высоты  $z$  для частиц сажи в случае отрицательного «солнечного» фотофореза.

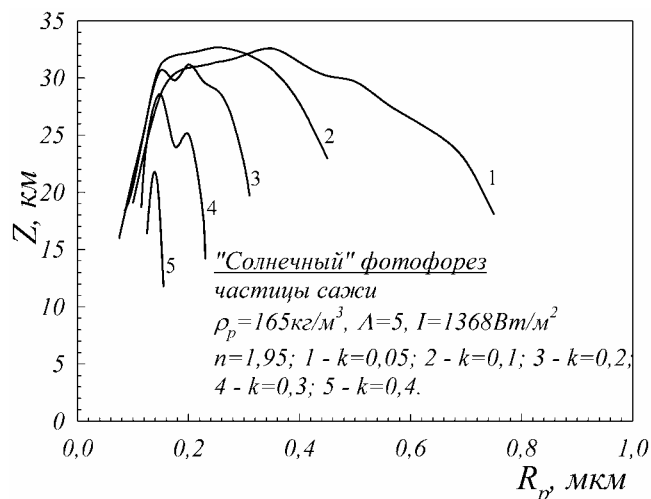


Рис. 15. Высоты левитации  $z^*$  для частиц сажи различных размеров в стратосфере под действием отрицательного «солнечного» фотофореза

Выше тропопаузы (с высот примерно 15 км) радиометрический фотофорез может обоснованно рассматриваться как один из потенциально значимых механизмов вертикального переноса хорошо поглощающих, легких и слаботеплопроводных аэрозолей.

На определенных высотах  $z^*$ , где сила тяжести уравнивается противоположно направленной силой отрицательного «солнечного» фотофореза, возможна левитация частиц. На рис. 15 видно, что частицы сажи с  $R_p = 0,075 \div 0,75$  мкм при  $k = 0,05 \div 0,4$  могут левитировать за счет сил отрицательного «солнечного» фотофореза на высотах  $12 \div 32$  км в нижней и

средней стратосфере. Левитация невозможна для субмикронных частиц с  $R_p < 0,07$  мкм (для них значения  $J_1$  либо слишком малы и сила тяжести превышает фотофоретическую силу; либо отрицательны, что соответствует положительному фотофорезу) и для частиц с  $R_p > 0,8$  мкм (для таких частиц  $J_1$  также отрицателен). Таким образом, «солнечный» фотофорез в стационарной атмосфере может быть причиной образования достаточно широких слоев субмикронного сажевого аэрозоля в стратосфере.

Ниже представлены оценки времен оседания частиц сажи с определенной высоты  $z_0$  в средней атмосфере до границы тропопаузы и оценки времен их подъема с определенных высот до высот левитации под действием фотофоретических сил. Для частиц с  $R_p = 0,2 \div 0,4$  мкм характерные времена фотофоретического подъема от поверхности Земли до высот левитации составляют 25÷30 лет (рис. 16). Частицы с  $R_p \leq 0,07$  мкм и  $R_p \geq 0,5$  мкм не испытывают вертикального подъема против силы тяжести, а времена их оседания с высоты 50 км представлены соответствующими кривыми на рис. 16. Увеличение плотности частиц приводит к ускорению их гравитационного оседания: скорость вертикального подъема становится меньше, полная скорость оседания увеличивается, а высоты левитации для частиц с большей плотностью становятся меньше.

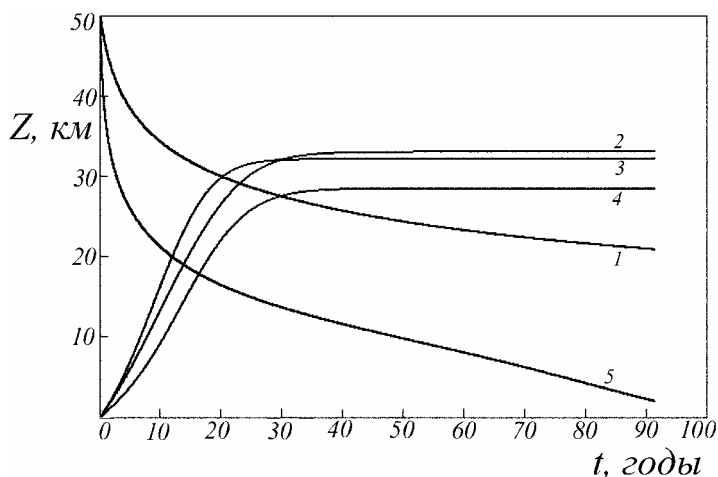


Рис. 16. Времена оседания частиц сажи ( $\rho_p = 165$  кг/м<sup>3</sup>,  $\Lambda = 5$ ,  $k = 0,1$ ) с  $R_p = 0,07$  мкм (кривая 1) и 0,5 мкм (кривая 5) с высоты 50 км и времена подъема частиц с  $R_p = 0,2$  мкм, 0,3 мкм и 0,4 мкм (кривые 2, 3 и 4 соответственно) до высот левитации в поле солнечного излучения.

*Фотофорез аэрозолей в поле уходящего теплового излучения Земли.* Как и в случае «солнечного» фотофореза, частицы сажи в поле длинноволнового излучения демонстрируют высокую чувствительность к возможным фотофоретическим эффектам. Представленные на рис. 17 результаты расчетов фотофоретической силы для частиц сажи проводились при  $m = 2,42 + 1,02i$  ( $\lambda = 10,6$  мкм) для размеров частиц  $R_p = 0,05 \div 5,0$  мкм при использовании модели стандартной атмосферы США. Такие частицы в поле теплового излучения испытывают только положительный фотофорез, что следует из зависимостей фактора  $J_1$ , представленных на рис. 18.



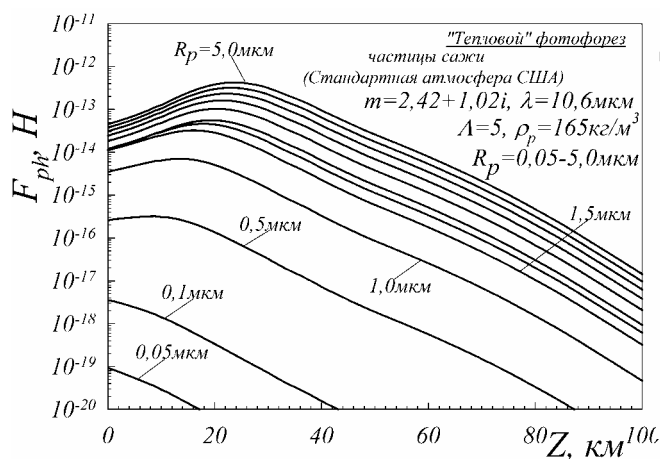


Рис. 17. Фотофоретическая сила  $F_{ph}$  для частиц сажи в зависимости от высоты  $z$ .

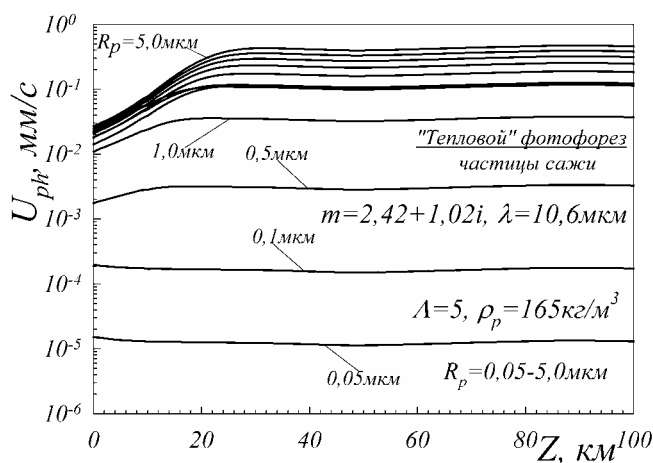
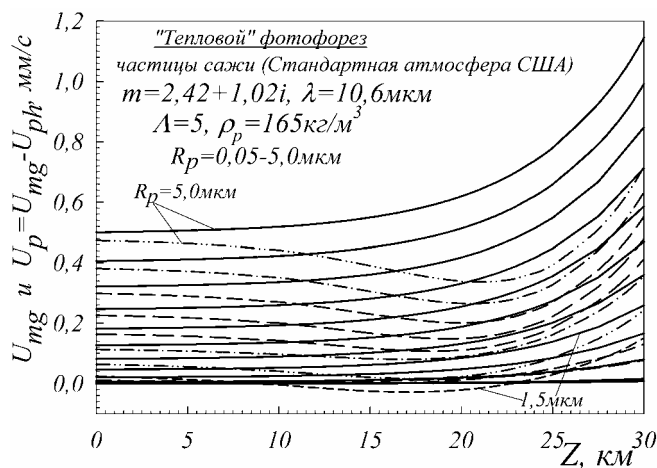


Рис.19. Скорость фотофоретического движения частиц сажи.



Из зависимостей для параметра  $\alpha$  видно (рис. 21), что частицы размерами около  $R_p = 1,5 \text{ мкм}$  демонстрируют максимальный фотофоретический эффект (эти размеры соответствуют газокинетическому максимуму фотофоретической силы для частиц сажи). Стоит отметить, что в случае «солнечного» фотофореза максимум рассматриваемого параметра достигается для частиц с  $R_p = 0,3 \text{ мкм}$ . Увеличение плотности и

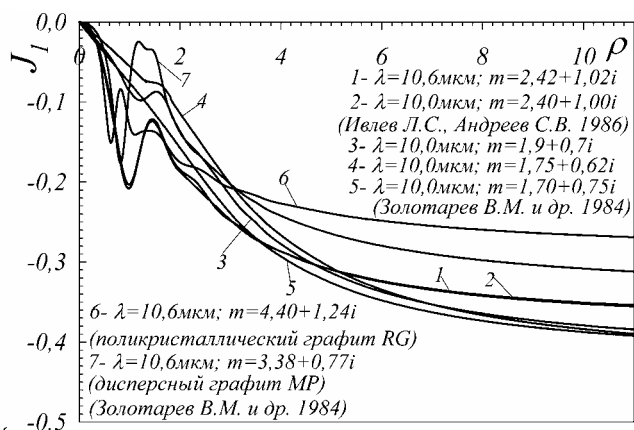


Рис. 18. Фактор  $J_1$  для частиц сажи в случае «теплового» фотофореза.

Скорости положительного «теплового» фотофореза частиц сажи для рассматриваемого диапазона размеров изменяются от десятых долей до сотен микрометров в секунду (рис. 19). Из рис. 20 следует, что фотофорез может существенно уменьшать полные скорости оседания достаточно крупных частиц сажи (размерами до  $R_p = 5 \text{ мкм}$ ).

Рис. 20. Сопоставление расчетов скорости гравитационного оседания частиц сажи различных размеров (пунктирные кривые) и полной скорости оседания частиц с учетом действия сил «теплового» фотофореза (сплошные кривые).

теплопроводности частиц приводят к уменьшению  $\alpha$  для частиц фиксированного размера (рис. 22).

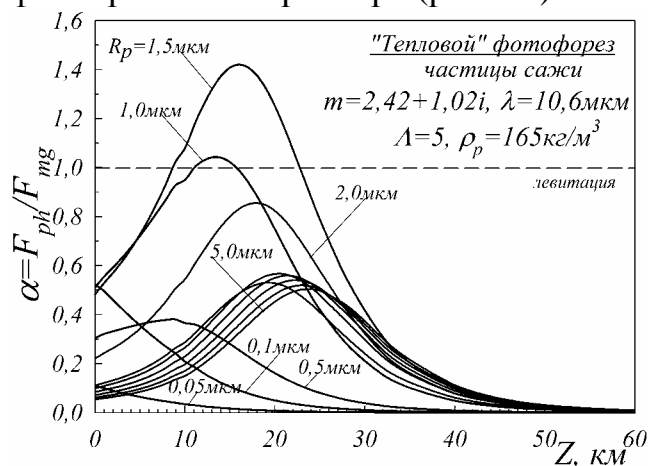


Рис. 21. Параметр  $\alpha$  для частиц сажи различных размеров в зависимости от высоты  $z$ .

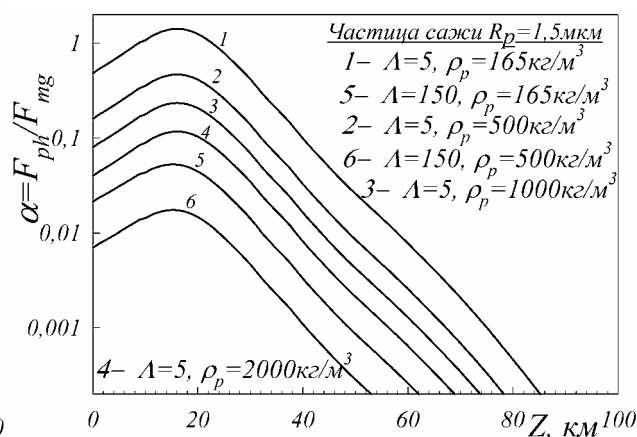


Рис. 22. Параметр  $\alpha$  для частиц сажи в зависимости от  $z$  для различных значений  $\rho$  и  $\Lambda$ .

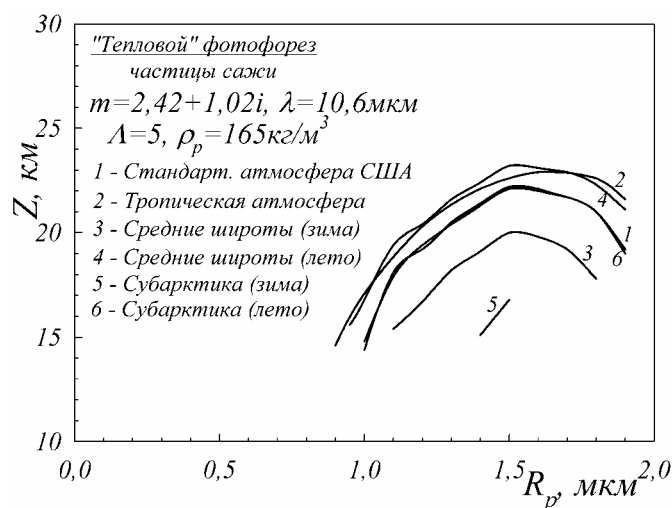


Рис. 23. Высоты фотофоретической левитации  $z^*$  для частиц сажи под действием «теплового» фотофореза.

На рис. 23 представлены кривые силового равновесия частиц сажи (высоты левитации) для различных широтно-сезонных условий. Частицы сажи размерами  $R_p = 0,95 \div 1,9$  мкм могут испытывать вертикальный подъем против силы тяжести, а затем левитировать за счет сил «теплового» фотофореза на высотах  $15 \div 23$  км.

Оценки времен оседания частиц сажи с задаваемой высоты  $z_0$  и времен подъема до высот левитации под действием фотофоретических сил показаны на рис. 24. Частицы с  $R_p = 1,3 \div 1,8$  мкм достигают высот левитации за времена  $20 \div 25$  лет. Отметим, что частицы с  $R_p \leq 1,1$  мкм и  $R_p \geq 1,9$  мкм не испытывают вертикального подъема.

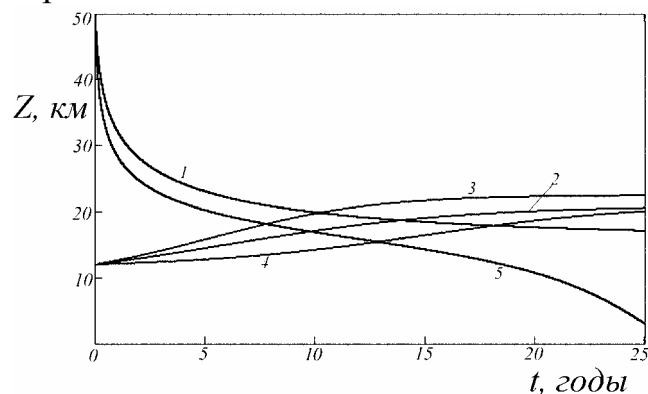


Рис. 24. Времена оседания частиц сажи ( $\rho_p = 165$  кг/м<sup>3</sup>,  $\Lambda = 5$ ) с  $R_p = 1,0$  мкм (кривая 1) и  $2,0$  мкм (кривая 5) с высоты  $50$  км и времена подъема частиц с  $R_p = 1,3$ ;  $1,5$  и  $1,8$  мкм с высоты  $12$  км (кривые 2, 3 и 4 соответственно) до высот левитации в поле теплового излучения.

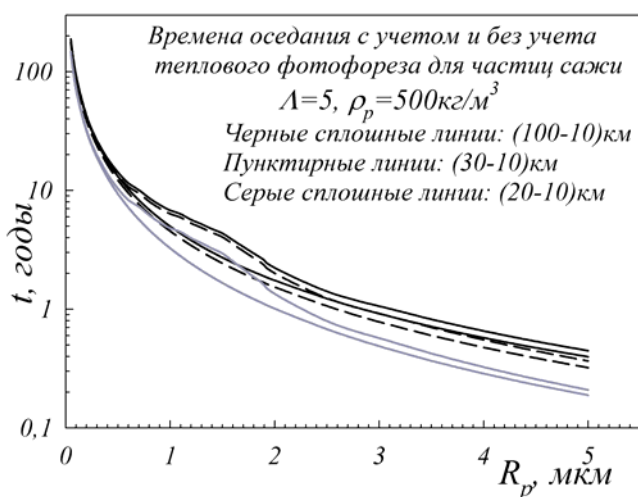


Рис. 25. Времена оседания частиц сажи с определенных высот.

Рис. 25 показывает времена оседания частиц сажи с определенных высот в мезосфере и стратосфере до условной границы тропопаузы (10 км) с учетом и без учета влияния «теплого» фотофореза. Для частиц сажи с  $\rho_p = 500 \text{ кг/м}^3$ ,  $\Lambda = 5$  «тепловой» фотофорез может существенно увеличивать времена оседания, особенно для частиц размерами  $1 \div 2 \text{ мкм}$ .

Несмотря на то, что интенсивности теплового излучения составляют около четверти интенсивности коротковолнового солнечного излучения, «тепловой» фотофорез может рассматриваться как эффективный силовой механизм вертикального переноса стратосферного аэрозоля. Обладая сходными с «солнечным» фотофорезом качественными характеристиками (вертикальный подъем частиц против силы тяжести вплоть до возможности левитации), «тепловой» фотофорез эффективно действует на более крупные частицы, а соответствующие высоты левитации уменьшаются. Выраженный суточный ход для «теплого» фотофореза отсутствует, так как потоки уходящего теплового излучения обладают малой вариативностью на временных масштабах от суток до сезона. Суммарное действие «солнечного» и «теплого» фотофореза может проявляться в вертикальном переносе частиц сажи против силы тяжести в интервале  $0,075 < R_p < 1,9 \text{ мкм}$  с фактическим перекрытием двух диапазонов размеров (рис. 15 и 23).

*Сравнение эффективности радиометрического фотофореза с другими механизмами вертикального переноса аэрозолей в средней атмосфере.* Транспортные возможности «солнечного» и «теплого» фотофореза были оценены выше для модели стационарной атмосферы, не учитывающей циркуляционных движений воздушных масс. Считается, что на глобальных временных масштабах (для стратосферы – это 7-10 лет) можно обоснованно пренебречь мелко- и среднемасштабными механизмами вертикального переноса аэрозолей, в первую очередь – турбулентной диффузией [16-17]. Одним из постоянно действующих в средней атмосфере механизмов вертикального переноса аэрозолей является, по-видимому, вертикальный ветер, обусловленный медленными перемещениями воздушных масс [7]. Характерные скорости среднегодового стратосферного вертикального ветра составляют  $\pm 0,5 \text{ мм/с}$  [18].

На рис. 26 представлены скорости движения частиц сажи под действием фотофореза, усредненного вертикального ветра и силы тяжести. Положительные значения соответствуют подъему против силы тяжести,

отрицательные – оседанию частиц. Видно, что фотофоретическая скорость и скорость гравитационного оседания сопоставимы до высот порядка 30 км; действие фотофореза становится определяющим на высотах, где действие вертикального ветра и силы тяжести компенсируют друг друга, а полная скорость движения частиц обращается в нуль (для экватора это высоты около 16, 28 и 32 км). В южной полярной области в интервале высот 20÷40 км и в северной полярной области до высот порядка 20 км действие «теплового» фотофореза также представляется существенным и значимым.

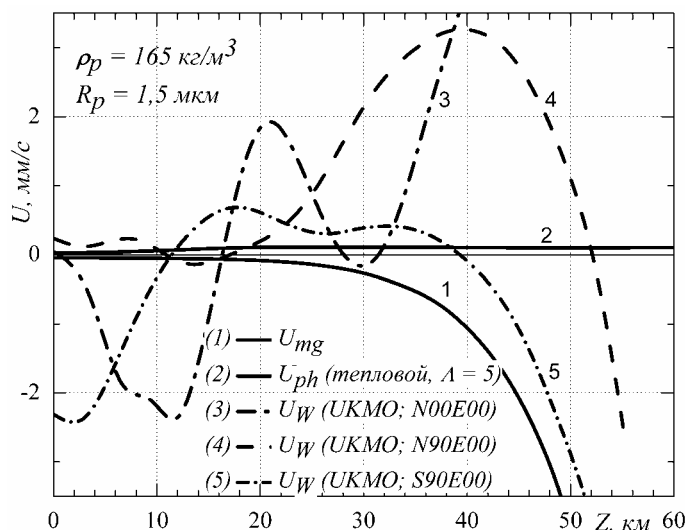


Рис. 26. Характерные скорости движения частиц: скорость гравитационной седиментации (1); скорость движения частиц под действием теплового фотофореза (2); полная скорость движения частиц с учетом вертикального ветра (усредненные за 1993-2005 года данные: 3 – экватор, 4 – северный полюс, 5 – южный полюс) и гравитационной седиментации.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ

1. Проанализированы закономерности в зависимостях от дифракционного параметра совокупности микрофизических оптических характеристик, ответственных за поглощение излучения и последующую динамику частиц. Показано, что для модели однородных сфер можно выделить три класса частиц: слабо-, умеренно- и сильнопоглощающие. Данный вывод справедлив как для частиц основных типов атмосферного аэрозоля, так и для модельных частиц с варьируемыми значениями комплексного показателя преломления.
2. Впервые проведены систематический расчет и анализ зависимостей фактора асимметрии поглощения излучения  $J_1$  от дифракционного параметра для основных типов атмосферного аэрозоля и модельных частиц. Выявлены закономерности изменения величины и знака фактора  $J_1$ , определяющего направление фотофоретического движения частиц. Полученные результаты позволяют замкнуть комплексную задачу о фотофорезе и рассчитать абсолютные значения фотофоретической силы и скорости движения частиц.
3. Предложена обоснованная постановка задачи о фотофорезе аэрозолей в поле падающего коротковолнового солнечного излучения. Проведены расчеты для сил и скоростей движения частиц сажи на различных высотах в стратосфере. Показано, что в условиях стационарной атмосферы возможен подъем частиц размерами  $R_p = 0,08 \div 0,7 \text{ мкм}$  против силы тяжести и их левитация на высотах 12÷32 км под действием сил отрицательного «солнечного» фотофореза. Таким образом, «солнечный» фотофорез может рассматриваться как эффективный

механизм вертикального переноса поглощающих субмикронных частиц до высот средней стратосферы.

4. Впервые проведена модельная постановка задачи о фотофорезе аэрозолей в поле уходящего длинноволнового излучения Земли. Показано, что частицы сажи размерами  $R_p = 1,0 \div 1,9$  мкм могут испытывать вертикальный подъем против силы тяжести и левитировать на высотах  $15 \div 23$  км под действием сил положительного «теплового» фотофореза.

5. В приближении квазистационарного движения выполнены оценки времен как подъема частиц сажи до высот левитации, так и их оседания с задаваемых высот под действием фотофоретических сил и силы тяжести. Характерные времена подъема частиц субмикронного размера под действием сил отрицательного «солнечного» фотофореза до высот левитации составляют  $25 \div 30$  лет. В случае «теплового» фотофореза частицы размерами  $R_p = 1,3 \div 1,8$  мкм достигают соответствующих высот левитации за времена  $20 \div 25$  лет.

6. Обосновывается, что радиометрический фотофорез (как «солнечный», так и «тепловой») можно рассматривать как достаточно эффективный механизм вертикального переноса хорошо поглощающих, легких и слаботеплопроводных частиц атмосферного аэрозоля в нижней и средней стратосфере на глобальном временном масштабе. Силы фотофореза могут конкурировать с силами тяжести до высот  $30 \div 35$  км для частиц субмикронного и микронного размера. Показано, что в ряде случаев скорости фотофореза вполне сопоставимы со средними скоростями вертикального ветрового переноса частиц в стратосфере.

### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев К.Я. Радиационное возмущающее воздействие, обусловленное аэрозолями // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т.16. № 1. С.5-18.
2. Haywood J., Boucher O. Estimates of direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review // Rev. Geophys. 2000. V.38. N 4. P.513-543.
3. Hansen J., Sato M., Ruedy R. et al. Global warming in the twenty-first century: an alternative scenario // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2000. V.97. P.9875-9880.
4. Пришивалко А.П. Оптические и тепловые поля внутри светорассеивающих частиц. Минск: Наука и техника, 1983. 190 с.
5. Chernyak V., Beresnev S. Photophoresis of aerosol particles // J. Aerosol. Sci. 1993. V.24. N 7. P.857-866.
6. Krauss O., Wurm G. Photophoresis and the pile-up of dust in young circumstellar disks // Astrophys. J. 2005. V.630. P.1088-1092.
7. Plumb R.A. Stratospheric transport // J. Meteor. Soc. Japan. 2002. V.80. P.793-809.
8. Pueschel R.F., Boering K.A., Verma S. et al. Soot aerosol in the lower stratosphere: pole-to-pole variability and contribution by aircraft // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. N D11. P. 13,113-13,118.
9. Baumgardner D., Kok G., Raga G. Warming of the Arctic lower stratosphere by light absorbing particles // Geophys. Res. Lett. 2004. V.31, L06117, doi:10.1029/2003GL018883.

10. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
11. Barber P.W., Hill S.C. Light scattering by particles: computational methods. Singapore: World Scientific, 1990. 261 p.
12. Ковалев Ф.Д. Экспериментальное исследование фотофореза в газах. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – Екатеринбург, 2003. – 24 с.
13. Beresnev S.A., Chernyak V.G., Fomyagin G.A. Motion of a spherical particle in a rarefied gas. Part 2. Drag and thermal polarization // J. Fluid Mech. 1990. V.219. P.405-421.
14. Динамическая метеорология / Под ред. Д.Л. Лайхтмана. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 608 с.
15. Грибанов К.Г., Захаров В.И., Ташкун С.А. Пакет программ FIRE-ARMS и его применение в задачах пассивного ИК-зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т.12. № 4. С.372-375.
16. Haynes P. Stratospheric dynamics // Annu. Rev. Fluid Mech. 2005. V.37. P.263–293.
17. Fussen D., Vanhellemont F., Dingen C. Evolution of stratospheric aerosols in the post-Pinatubo period measured by solar occultation // Atmos. Environ. 2001. V.35. N30. P.5067-5078.
18. Beresnev S., Kochneva L., Gryazin V. Vertical transport of carbonaceous particles in stratosphere. In: Conference on Visibility, Aerosols, and Atmospheric Optics (Vienna, September 3-6, 2006). Abstracts. Vienna: Institute of Experimental Physics of the University of Vienna, 2006. P.8-9.

#### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Летфулова Л.Б., Старинов А.В., Береснев С.А. Поглощающие свойства атмосферного аэрозоля: анализ микрофизических оптических характеристик // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 1. С. 69-75.
2. Береснев С.А., Кочнева Л.Б., Суетин П.Е. Расчет и анализ микрофизических оптических характеристик атмосферного аэрозоля: модель однородных сферических частиц // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 5-6. С.522-529.
3. Береснев С.А., Ковалев Ф.Д., Кочнева Л.Б., Рунков В.А., Суетин П.Е., Черемисин А.А. О возможности фотофоретической левитации частиц в стратосфере // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 52-57.
4. Береснев С.А., Кочнева Л.Б. Фактор асимметрии поглощения излучения и фотофорез аэрозолей // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 2. С. 134-141.
5. Береснев С.А., Кочнева Л.Б., Суетин П.Е., Захаров В.И., Грибанов К.Г. Фотофорез атмосферных аэрозолей в поле теплового излучения Земли // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 5-6. С. 470-477.
6. Береснев С.А., Кочнева Л.Б., Суетин П.Е. Фотофорез аэрозолей в атмосфере Земли // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10. № 2. С. 297-311.

7. Кочнева Л.Б. Теоретический анализ микрофизических оптических характеристик атмосферного аэрозоля. В кн.: Научный поиск: новые имена. Сб. лучш. студен. работ 2001 г. Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 2002. С. 29-64.
8. Береснев С.А., Суетин П.Е., Ковалев Ф.Д., Кочнева Л.Б., Старинов А.В. Поглощающие свойства, фактор асимметрии поглощения и фотофорез атмосферных аэрозолей. В кн.: Материалы 3-й Межд. конф. «Естественные и антропогенные аэрозоли» (Санкт-Петербург, 24-27 сентября 2001 г.). Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ, 2003. С. 115-120.
9. Береснев С.А., Ковалев Ф.Д., Кочнева Л.Б., Грязин В.И. О роли фотофореза в вертикальном переносе аэрозолей в верхней тропосфере – нижней стратосфере. В кн.: Естественные и антропогенные аэрозоли. Сборник трудов 4-ой межд. конф. (Санкт-Петербург, 6-9 октября 2003 г.). СПб.: ВВМ, 2005. С.370-383 (ISBN 5-9651-0165-1).
10. Beresnev S.A., Kochneva L.B., Gryazine V.I., Griбанov K.G. Vertical transport of absorbing aerosol in radiation field at the middle atmosphere altitudes. XII Joint International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS, June 27-30, 2005. Proceedings of SPIE. 2006. V.6160. P.797-807.

Подписано в печать 22.12.2006г. Формат 60×84 1/16  
Бумага типографская. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.  
Заказ № . Печать офсетная. 620083, Екатеринбург,  
К-83, пр.Ленина, 51. Типолаборатория УрГУ.